中国生态农业学报 2016年2月 第24卷 第2期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2016, 24(2): 154−162



DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151082

# 长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变*

许咏梅[1] 刘 骅[1,2] 王西和[1,2]

(1. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所 乌鲁木齐 830091;
2. 国家灰漠土长期肥力与肥料效应监测站 乌鲁木齐 830091)

**摘 要** 为明确长期不同施肥下新疆灰漠土有机碳和作物产量演变特征，依托始于1990年的灰漠土肥力长期定位监测试验，选择对照(CK，不施肥)、施氮磷肥(NP)、氮磷钾平衡施肥(NPK)、氮磷钾配合常量有机肥(NPKM)、氮磷钾配合高量有机肥(hNPKM，有机肥施用量为NPKM的2倍)、氮磷钾配合秸秆还田(NPKS)6个处理，分析不同处理下土壤有机碳和小麦、玉米产量演变特征，探讨碳投入及有机碳与作物产量的关系。结果表明：1)长期耗竭种植(CK)、连续施用NP或NPK肥，灰漠土有机碳含量持续下降，年均下降速率分别为0.094 g·kg$^{-1}$、0.043 g·kg$^{-1}$和0.053 g·kg$^{-1}$，表明施化肥(NP、NPK)不能维持土壤有机碳含量，不利于土壤肥力的保持。NPKM和hNPKM处理，土壤有机碳显著增加，年均增加0.360 g·kg$^{-1}$和0.575 g·kg$^{-1}$，增施有机肥是快速提高灰漠土肥力的重要措施。秸秆还田处理(NKPS)，土壤有机碳年均增幅0.006 g·kg$^{-1}$，与NPK处理对比，秸秆还田虽没有大幅度提高土壤有机碳，但维持了土壤肥力。2)较CK，长期化肥有机肥配施(NPKM、hNPKM)显著增加了作物产量($P$<0.05)。与NP和NPK比较，长期化肥有机肥配施显著提高了小麦产量($P$<0.05)，但玉米产量与施化肥处理差异不显著($P$>0.05)，玉米产量以平衡施肥(NPK)的增幅最高，达到220 kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$。小麦的产量变异系数(29.1%~43.9%)高于玉米产量变异(19.0%~32.7%)。化肥配合秸秆还田(NPKS)处理的小麦增产幅度与高量施用有机肥(hNPKM)处理接近，喻示了秸秆还田对作物增产的作用不可忽视。3)碳投入与土壤有机碳和小麦、玉米产量有显著线性正相关($P$<0.05)。基于以上分析，在干旱区灰漠土增加土壤碳投入(有机肥或秸秆)仍然是最基本的土壤培肥措施。

**关键词** 长期施肥 灰漠土 土壤有机碳 产量演变 碳投入
**中图分类号:** S158.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)02-0154-09

# Evolution of soil organic carbon and crop yield under long-term fertilization in grey desert soils*

XU Yongmei[1], LIU Hua[1,2], WANG Xihe[1,2]

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Agricultural Water Reduction, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;
2. National Grey Desert Soil Fertility and Fertilizer Effect Monitoring Station, Urumqi 830091, China)

**Abstract** With a cropping area of 1.76 million hectares, the grey desert soil (hapliccalcisol) is crucial for agricultural development in Xinjiang, Northwest China. The use of chemical and manure fertilizers has been an effective way of increasing crop production. However, there has been limited information on crop yield and soil organic carbon evolution in the region under long-term fertilization using both organic and inorganic fertilizers. Thus this study was conducted to determine the relationship among carbon input, soil organic carbon and crop yield in grey desert soil in Modern Agricultural S&T Demonstration Garden of Xinjiang Academy of Agricultural Sciences. The study also analyzed the trends in variations in crop yield and soil organic carbon under different long-term fertilization practices. The results of the study will provide scientific database which can be used to improve soil fertility and promote sustainable development of crop production in the study area.

* 新疆自治区自然科学基金面上项目(2013211A039)资助
许咏梅，主要研究方向为土壤肥力与培育。E-mail: xym1973@163.com
收稿日期: 2015−10−08 接受日期: 2015−11−30

* Supported by the Provincial Natural Science Foundation of Xinjiang (No. 2013211A039)
Corresponding author, XU Yongmei, E-mail: xym1973@163.com
Received Oct. 8, 2015; accepted Nov. 30, 2015

A long-term experiment was conducted using various fertilizations in 1990–2013 in wheat (*Triticum aestivium*) and maize (*Zea mays*) crop rotation system in grey desert soil. The fertilization treatments included the control without fertilization (CK), chemical nitrogen plus phosphate fertilization (NP), chemical nitrogen plus phosphate and potassium fertilization (NPK), NPK plus animal manure (NPKM), two times animal manure of NPKM (hNPKM), and NPK plus straw (NPKS). The results showed that: 1) soil organic carbon contents of CK, NP and NPK decreased by 0.094 $g·kg^{-1}·a^{-1}$, 0.043 $g·kg^{-1}·a^{-1}$ and 0.053 $g·kg^{-1}·a^{-1}$, respectively, from 1990 to 2013. Although chemical fertilization increased crop production, but decreased soil fertility. Annual rates of soil organic carbon increase under NPKM and hNPKM treatments were 0.360 $g·kg^{-1}$ and 0.575 $g·kg^{-1}$, respectively, from 1990 to 2013. Therefore the application of manure played an important role in improvement of soil fertility for crop cultivation. 2) Compared with CK, long-term application of chemical fertilizers with manure (NPKM and hNPKM) increased crop yield. However, compared with NP and NPK treatments, chemical fertilizers with manure (NPKM and hNPKM) significantly increased wheat yield ($P < 0.05$). There was, however, no significant difference in maize yield between observed manure treatments and chemical fertilizers treatments ($P > 0.05$). The highest maize yield was 220 $kg·hm^{-2}·a^{-1}$ under NPK treatment. The coefficient of variation of wheat yield (29.1%–43.9%) was higher than that of maize yield (19.0%–32.7%). There were no differences between NPK with straw and NPK with manure, which suggesting that the effects of straw return on crop yield was not negligible. 3) Carbon input was significantly positively correlated with soil organic carbon and crop yield ($P < 0.05$). Thus increasing carbon input (manure or straw return) was a key of improving soil fertility in the grey desert soil region.
**Keywords**　Long-term fertilization; Grey desert soil; Soil organic carbon; Crop yield evolution; Carbon input



土壤肥力和作物产量提升一直是农业研究关注的焦点。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是表征土壤肥力高低的主要指标，也是土壤学研究中肥力的代表性指标，在生态系统生产力、农业生态系统功能及农田肥力中占有非常重要的位置[1]，它能保持土壤适宜的理化性质，为作物生长提供碳源[2]，因此对保证土地生产力和粮食安全具有重要意义[3–4]。新疆灰漠土面积 178.95 万 $hm^2$[5]，是新疆北部主要的地带性土壤，也是天山北坡经济带重要的农业土壤。由于其分布于干旱、半干旱地区，土壤贫瘠是作物高产稳产的主要限制因子，快速提高灰漠土有机碳对促进新疆农业发展至关重要。

国内外研究表明，通过施用有机肥、化肥或秸秆还田等合理的农业措施可以实现农田 SOC 的提高。英国洛桑研究所的 Broadbalk(始于 1843 年)和美国 Morrow(始于 1888 年)两个著名的长期试验均报道，与对照小区相比，长期施用化肥(氮、磷、钾)SOC 有所增加，采用化肥配合有机肥能够显著提高 SOC 含量和作物产量[6]。在我国红壤[7]、黑土[8]、塿土[9]、栗褐土[10]等多个长期试验的肥力监测中也证实了连续施用有机物料或化肥，SOC 和作物产量有所提升。在 SOC 与作物产量变化规律方面，邱建军等[11]以我国东北玉米、华北夏玉米–冬小麦轮作、西北春玉米、中南单季水稻、华东双季稻、西南水稻–冬小麦等 6 种栽培模式为研究对象，模拟改变有机碳本底值对作物产量的影响，结果表明每增加 1 $g(C)·kg^{-1}$，作物产量将分别增加 176 $kg·hm^{-2}$、454 $kg·hm^{-2}$、328 $kg·hm^{-2}$、185 $kg·hm^{-2}$、266 $kg·hm^{-2}$ 和 229 $kg·hm^{-2}$。上述研究结果明确了有机肥和化肥对 SOC 及生产力的影响效应。

尽管目前在不同土壤类型、不同施肥措施下有机碳和产量变化已有一些研究，但由于区域和土壤本底值的差异，或者试验方法、监测周期不同，获得的结果并不能涵盖所有土壤类型，加之干旱区长期试验数据的缺乏，对新疆绿洲灰漠土农田土壤条件下施肥影响有机碳及产量的演变研究缺乏。本研究依托新疆灰漠土农田肥力与肥料效应长期试验，通过对长期不同施肥条件下 SOC 和产量的演变趋势分析，定量化描述化肥、有机肥、秸秆还田导致的碳投入差异与有机碳、作物产量的关系，为新疆灰漠土培肥措施的选择提供依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验区概况

长期定位施肥试验位于新疆乌鲁木齐以北 25 km 的新疆农业科学院国家现代农业科技示范园内(N43°95′26″, E87°46′45″)。试验区属典型中亚干旱区山地–绿洲生态系统，海拔 600 m，年均降雨量 310 mm，年均蒸发量 2 570 mm，干燥度 8.29；年平均气温 7.7 ℃，平均日照时数 2 590 h，无霜期 156 d。试验土壤为灰漠土，初始基本理化性质见表 1。

### 1.2　田间试验设计

长期肥力监测定位试验始于 1990 年，研究时段为 1990—2013 年，共计 24 年。施肥处理包括不施肥、连续施化肥和化肥配合有机肥等共计 12 个，本研究选择其中的 6 个处理进行采样和分析。具体的年度纯养分投入量见表 2。氮、磷、钾肥分别采用

表 1 灰漠土长期试验区不同土层土壤初始理化性质
Table 1 Initial soil physical and chemical properties in different layers of grey desert soil in the tested area

| 指标 Index | 土层 Soil layer (cm) | |
|---|---|---|
| | 0~20 | 20~40 |
| 容重 Bulk density ($g\cdot cm^{-3}$) | 1.25 | — |
| 黏粒(<0.001 mm)含量 Clay (<0.001 mm) content (%) | 28.3 | 38.1 |
| pH | 7.95 | 8.03 |
| 有机碳含量 Organic carbon content ($g\cdot kg^{-1}$) | 8.80 | 7.77 |
| 全氮含量 Total N content ($g\cdot kg^{-1}$) | 0.87 | 0.90 |
| 全磷含量 Total P content ($g\cdot kg^{-1}$) | 0.67 | 0.75 |
| 全钾含量 Total K content ($g\cdot kg^{-1}$) | 19.80 | 21.80 |
| 阳离子代换量 Cation exchange capacity ($cmol\cdot kg^{-1}$) | 16.2 | — |
| 碱解氮含量 Alkaline-hydrolyzable N content ($mg\cdot kg^{-1}$) | 84.0 | 77.4 |
| 速效磷含量 Olsen-P content ($mg\cdot kg^{-1}$) | 21.95 | 9.15 |
| 速效钾含量 $NH_4OAc$-extractable K content ($mg\cdot kg^{-1}$) | 602.3 | 432.6 |

尿素、磷酸二铵、硫酸钾。尿素含 N 46.0%，磷酸二铵含 N 18.0%、P 20.1%；硫酸钾含 K 44.8%。根据农业生产的实际，肥料施用量分为两个时段，第 1 时段为 1990—1994 年，第 2 时段为 1995 年至今。表中有机肥为腐熟羊粪，含 N 8.0 $g\cdot kg^{-1}$、P 2.3 $g\cdot kg^{-1}$、K 3.0 $g\cdot kg^{-1}$。秸秆还田处理为每年种植作物收获后地上部生物量全部粉碎还田。

### 1.3 田间试验管理

试验小区长 34.9 m，宽 13.4 m，面积 468 $m^2$。各小区间采用预制钢筋水泥板埋深 70 cm 间隔，地表露出 10 cm 加筑土埂，避免渗水和漏肥。由于历史原因，长期试验未设置重复，鉴于长期监测试验小区面积较大，因此田间采样中将每个处理划分 3 个亚区，分区采样，弥补缺少重复的不足。

灌溉和施肥方法：2008 年前，试验采用沟灌，2008 年开始更改为滴灌。肥料中化肥 60%总氮量和

表 2 不同处理 1990—1994 年和 1995—2013 年度养分输入量
Table 2 Average annual nutrients application of different treatments during1990–1994 and 1995–2013

| 处理 Treatment | 化肥 Chemical fertilizer ($kg\cdot hm^{-2}$) | | | | | | 有机肥 Animal manure ($t\cdot hm^{-2}$) | 秸秆 Straw ($t\cdot hm^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | | P | | K | | | |
| | 1990—1994 | 1995—2013 | 1990—1994 | 1995—2013 | 1990—1994 | 1995—2013 | | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NP | 99.4 | 241.5 | 29.2 | 60.2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NPK | 99.4 | 241.5 | 29.2 | 60.2 | 18.8 | 50.4 | 0 | 0 |
| NPKM | 29.8 | 84.9 | 8.7 | 22.4 | 6.7 | 10.1 | 30 | 0 |
| hNPKM | 59.6 | 151.8 | 17.4 | 39.4 | 13.4 | 15.5 | 60 | 0 |
| NPKS | 89.4 | 216.7 | 24.5 | 50.8 | 16.9 | 42.3 | 0 | 4.5(小麦秸秆)/9.0(玉米秸秆) 4.5 (wheat straw) / 9.0 (maize straw) |

100%磷钾肥作基肥，播种前均匀撒施地表，深翻后播种。剩余 40%的氮肥在作物春季结合第 1 次灌水追施，自 2008 年起采用滴灌时分次随水滴施。有机肥一般在秋季撒施；秸秆还田为当季作物收获后，地上部全部生物量粉碎还田并且深翻。

轮作模式：1999 年前采用玉米–春小麦–冬小麦轮作模式，1999 年种植一季棉花，2000—2008 年恢复为玉米–春麦–冬麦轮作；2009 年至今更改为棉花–玉米–冬小麦轮作模式。因此种植的主要作物是小麦和玉米，本研究中也以小麦和玉米季的产量和土壤变化为主要研究对象。

播种及收获时间：冬小麦播种时间为 9 月中旬，收获于第 2 年 7 月 20 日左右；春小麦播种时间为 3 月 20 日前后，收获于 7 月 25 日左右；玉米于 4 月 25 日前后播种，9 月 20 日左右收获。

作物品种：作物品种均采用当地主栽品种，一般都是同一个系列品种的更新换代。冬小麦品种采用‘新冬 17’、‘新冬 18’、‘新冬 28 号’，春小麦为‘新春 2 号’、‘新春 8 号’和‘新春 18 号’，玉米品种采用‘SC704’、‘新玉 7 号’、‘新玉 12 号’。

### 1.4 土壤样品的采集与分析

土壤样品于每年作物收获后采集。采用对角线取样方法，用直径 5 cm 不锈钢土钻采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤，每个亚区采集 5 个样点土样混合。样品采集后去除作物残根和小石头，风干，研磨过 0.25 mm 筛以备 SOC 测试，SOC 采用重铬酸钾容量法(DB/6500 B11 1440—87)测定。

采用 SPSS 软件对数据方差分析，邓肯氏新复极差方法进行多重比较；应用 Microsoft Excel 进行基本数据计算和制图。

### 1.5 作物残茬、有机肥及秸秆碳投入的计算方法

碳投入计算采用姜桂英[12]的方法:

1)作物残茬投入

小麦根茬碳投入[t(C)·hm$^{-2}$]=[($Y_g$+$Y_s$)×30%/70%×73.5%+$R_s$×$Y_s$]×(1−0.14)×399/1 000 (1)

玉米根茬碳投入[t(C)·hm$^{-2}$]=[($Y_g$+$Y_s$)×26%/74%×85.1%+$R_s$×$Y_s$]×(1−0.14)×444/1 000 (2)

式中: $Y_g$为籽粒产量; $Y_s$为秸秆产量; $R_s$为留茬系数, 小麦CK留茬所占秸秆生物量的比例为18.3%, 其他处理为13.1%, 玉米的所有处理为3%; 30%、26%为小麦、玉米光合作用进入地下部分的碳的比例, 70%和74%为相应地上部的碳比例; 73.5%和85.1%分别为小麦和玉米根系分布在0~20 cm土层中的比例; 0.14为风干基含水量; 399和444分别为小麦和玉米的烘干基碳含量(g·kg$^{-1}$); 1 000为单位换算系数。

2)有机肥碳投入

按照《中国有机肥料养分志》中羊粪含碳量为188 g·kg$^{-1}$, 水分含量为50%, 本试验中估算80%的羊粪施用在0~20 cm的耕作层。

有机肥碳投入[t(C)·hm$^{-2}$]=有机肥含碳量×(1−$W$%)×施用有机肥鲜基重/1 000 (3)

式中: $W$%为有机肥含水量。

3)秸秆碳投入

小麦秸秆碳投入=小麦秸秆产量×(1−0.14)×0.399 (4)

玉米秸秆碳投入[t(C)·hm$^{-2}$]=玉米秸秆产量×(1−0.14)×0.444 (5)

式中: 0.399和0.444分别为小麦和玉米的平均烘干有机碳含量, 0.14为小麦和玉米的风干基含水量。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期定位不同肥料处理对SOC的影响

SOC是衡量土壤肥力的重要指标之一, 长期施用化肥和有机肥, 使SOC含量发生显著改变, 本研究分析了1990—2013年灰漠土不同施肥处理耕层(0~20 cm)SOC演变趋势。结果表明: 灰漠土耕层SOC的变化具有明显规律(图1), 长期不施肥、连续施用NP肥或NPK肥, 年度间SOC含量波动变化, 而每一年的监测结果表示的是长期不同施肥条件下SOC输入与输出平衡的结果, 因此最近的测试结果能够表示不同施肥对SOC影响的累积效应。由此以试验初始SOC值8.800 g·kg$^{-1}$为基础指标, 24年后不施肥(CK)处理SOC含量下降到6.541 g·kg$^{-1}$, 年均下降0.094 g·kg$^{-1}$; 而连续施NP和NPK肥处理的SOC分别下降到7.772 g·kg$^{-1}$和7.540 g·kg$^{-1}$, 年均下降0.043 g·kg$^{-1}$和0.053 g·kg$^{-1}$。施NP肥或NPK肥的SOC含量略高于不施肥(CK), 但差异不显著($P$>0.05)。这一结果说明, 施化肥(NP、NPK)不能维持SOC含量。连续NPK化肥配合高量或常量有机肥施用使SOC值显著升高(图1), hNPKM和NPKM处理的SOC含量由8.800 g·kg$^{-1}$增至22.600 g·kg$^{-1}$和17.430 g·kg$^{-1}$, 年均分别增加0.575 g·kg$^{-1}$和0.360 g·kg$^{-1}$。因此有机肥对SOC本底值较低的灰漠土肥力提升效果显著。连续24年NPK肥配合秸秆还田土壤SOC含量为8.945 g·kg$^{-1}$, 较试验初始土壤值增加了0.145 g·kg$^{-1}$, 年均提高0.006 g·kg$^{-1}$, 与NPK处理对比, 秸秆还田虽然没有大幅度提高SOC, 但是可弥补只施用NPK肥导致的碳投入的不足, 维持了土壤肥力。

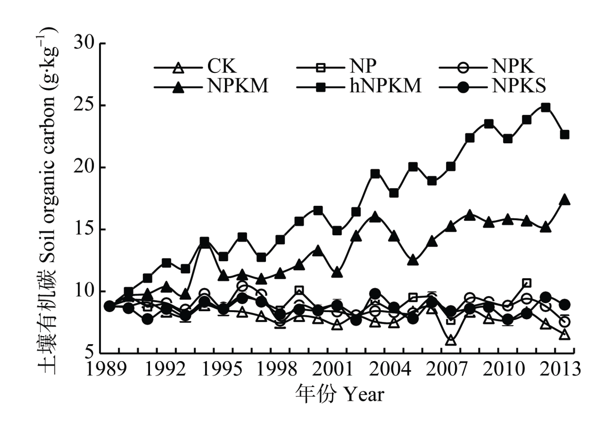



图1 1990—2013年长期不同施肥处理下灰漠土有机碳含量的变化

Fig. 1 Change of soil organic carbon content in grey desert soil under different long-term fertilization treatments from 1990 to 2013

采用线性方程拟合对灰漠土SOC含量与施肥年限的相关关系进行分析, 结果见表3。从表3可以看出: 长期高量或常量施用有机肥, SOC显著增加, 与施肥年限之间符合线性正相关($P$<0.01), 其累积速率分别为0.626 g·kg$^{-1}$·a$^{-1}$、0.305 g·kg$^{-1}$·a$^{-1}$, 有机肥

表3 长期不同施肥处理下灰漠土有机碳含量($y$)与试验年限($x$)的相关性($n$=24)

Table 3 Correlation analysis between soil organic carbon content ($y$) and fertilization years ($x$) in grey desert soil under different long-term fertilization treatments

| 处理 Treatment | 拟合方程 Fitting equation | $R^2$ |
|---|---|---|
| CK | $y$=−0.056$x$+8.717 | 0.341 9** |
| NP | $y$=−0.004$x$+8.994 | 0.001 7 |
| NPK | $y$=−0.024$x$+9.148 | 0.065 6 |
| NPKM | $y$=0.305$x$+9.132 | 0.816 3** |
| hNPKM | $y$=0.626$x$+8.730 | 0.951 5** |
| NPKS | $y$=0.004$x$+8.573 | 0.002 3 |

的投入提高了有机碳的积累速率，随着有机肥施用量的增加，累积速率提高。方程还显示，CK 处理的 SOC 含量与施肥年限符合线性负相关($P$<0.01)，即随着施肥年限的增加，不施肥处理的 SOC 含量持续下降，下降速率为 0.056 g·kg$^{-1}$·a$^{-1}$。NP、NPK、NPKS 处理 SOC 含量与施肥年限之间相关性不显著($P$>0.05)。

### 2.2　长期定位不同施肥处理下作物产量演变

1990—2013 年试验区共种植 12 季小麦和 8 季玉米，分别对小麦和玉米产量的演变特征进行分析。结果表明，与对照(CK)相比，长期施用化肥或化肥配施有机肥均能显著提高作物单产，其产量变化符合线性递增关系，而不施肥作物产量呈缓慢下降趋势(图 2)。



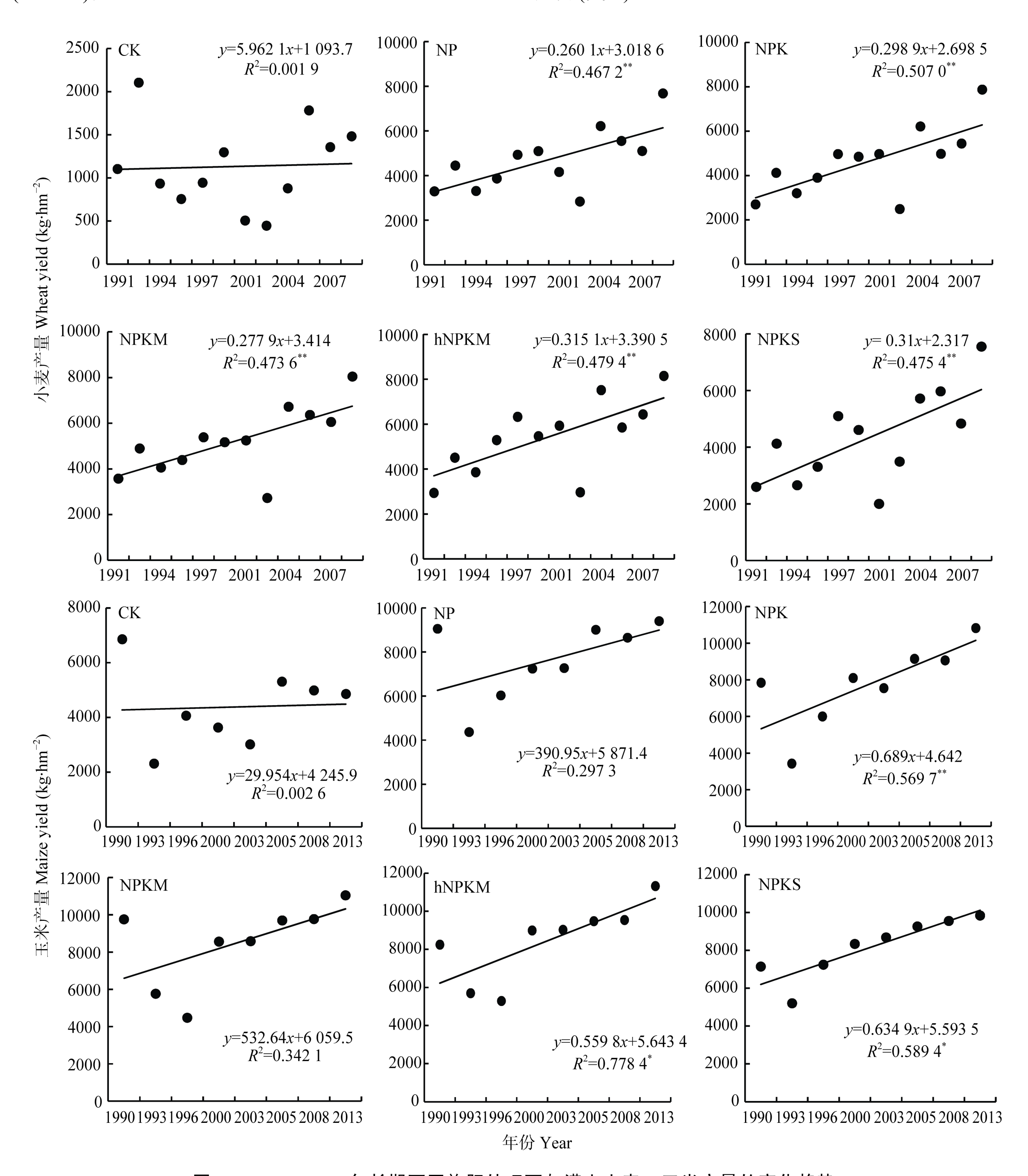



图 2　1990—2013 年长期不同施肥处理下灰漠土小麦、玉米产量的变化趋势

Fig. 2　Changes in yields of wheat and maize in grey desert soil under different long-term fertilization treatments from 1990 to 2013

对不同处理作物产量变异系数分析表明，长期连续施用相同肥料条件下，小麦产量变异系数(29.1%~43.9%)高于玉米产量变异(19.0%~32.7%)。此外，施用有机肥和化肥对作物产量变化率的影响也不同，小麦季高量施用有机肥处理的产量变化率高于施用化肥，但玉米季中平衡施肥的产量变化率最大(表 4)。

采用无重复试验方差分析方法，分别对小麦、玉米的产量进行方差检验，结果表明：长期施肥条件下，小麦和玉米产量的变化规律存在差异，在小麦种植季，不施肥连续种植(CK)的处理产量最低；NP、NPK 和 NPKS 处理显著高于 CK($P$<0.05)，施用有机肥处理(hNPKM、NPKM)的小麦产量又显著高于 NP、NPK 和 NPKS($P$<0.05)。对各处理的产量年均增加量分析，NP、NPK、NPKM、hNPKM 和 NPKS 处理的小麦产量年增加量分别为 153.1 kg·hm$^{-2}$、175.2 kg·hm$^{-2}$、163.7 kg·hm$^{-2}$、180.8 kg·hm$^{-2}$ 和 179.2 kg·hm$^{-2}$ (表 4)，配施有机物料小麦产量增幅较大，尤其值得注意的是化肥配合秸秆还田(NPKS)处理的小麦增产幅度与高量施用有机肥接近，说明秸秆还田对作物增产的作用不可忽视。各施肥处理产量的变异系数为 44.1%~49.7%。分析 CK 的小麦产量变化可以看出，CK 处理小麦产量每年下降 4.71 kg·hm$^{-2}$，但方差分析未达显著水平($P$>0.05)。玉米产量变化规律与小麦不同，施肥处理的玉米产量显著高于 CK($P$<0.05)，但化肥处理(NP、NPK)与有机肥处理(NPKM、hNPKM、NPKS)之间差异却不显著。对玉米产量年增加量的比较结果显示，玉米产量年增量按照 NPK>hNPKM>NPKS>NPKM>NP>CK 排序，以平衡施肥的增幅最高。NPK、hNPKM 和 NPKS 处理符合显著线性递增($P$<0.05)，变异幅度为 0.4%~2.7%，而 NP、NPKM 处理产量虽然有增加趋势，年增幅达到 123.0 kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$、170.0 kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$，但未达显著水平($P$>0.05)。不施肥处理玉米单产每年下降 6.2 kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$，未达显著水平($P$>0.05)(表 4)。

**表 4　1990—2013 年长期不同施肥处理下灰漠土小麦、玉米平均产量及变化**

Table 4　Means and changes of both wheat and maize yields in grey desert soil under different long-term fertilization treatments

| 处理 Treatment | 小麦 Wheat | | | 玉米 Maize | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 平均产量 Mean yield (kg·hm$^{-2}$) | 产量变化 Yield change (kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$) | 产量变异系数 Variance coefficient of yield (%) | 平均产量 Mean yield (kg·hm$^{-2}$) | 产量变化 Yield change (kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$) | 产量变异系数 Yield coefficient of variation (%) |
| CK | 1 132±500a | –4.7 | 43.9 | 4 381±1 430a | –6.2 | 32.7 |
| NP | 4 709±1 370bcd | 153.1 | 29.1 | 7 631±1 760b | 123.0 | 23.0 |
| NPK | 4 642±1 510bcd | 175.2 | 32.6 | 7 743±2 240b | 220.0 | 28.9 |
| NPKM | 5 221±1 460de | 163.7 | 27.9 | 8 456±2 230b | 170.0 | 26.4 |
| hNPKM | 5 439±1 640e | 180.8 | 30.2 | 8 451±2 030b | 205.0 | 24.0 |
| NPKS | 4 332±120b | 179.2 | 37.4 | 8 163±1 560b | 176.0 | 19.0 |

### 2.3　不同施肥碳投入差异及其与 SOC 和作物产量相关性

施肥对作物产量的贡献是非常显著的，作物在形成经济产量的同时，通过生物产量(秸秆还田)和地下部根茬返还被消耗的土壤养分，因此即使不施用有机肥料，通过残茬的归还可以补充一部分土壤肥力的损失，因此不同施肥措施形成了数量梯度很大的碳投入差异。表 5 是 1990—2013 年不同施肥处理下灰漠土年均碳投入情况。从表 5 可知，CK 处理的年均碳投入显著低于其他处理，这与不施肥处理作物生物量低，地下部根茬量也较低有关。与不施肥和施 NPK 肥相比，施用有机肥处理年均碳投入分别是前者的 6.24~10.3 倍和 2.94~4.86 倍。NPKS 处理的年均碳投入虽是不施肥和化肥处理的 4.89~2.35 倍，但作物产量与 NP、NPK 差异不显著(表 4)。可能的原因是秸秆碳的分解率高，在还未转化为稳定态碳物质前，就以其他形态损失了[12]。

以CK为参照，施肥处理的小麦、玉米年均产量减去CK的差值，也就是相对产量，与碳投入的值作散点图(图3a)，分析不同处理相对碳投入与作物相对产量之间的关系。结果表明：年均相对碳投入与玉米和小麦相对平均产量之间符合显著线性正相关：$y_{小麦}=136.5x+3\ 323.9$ ($R^2=0.57^*$)，$y_{玉米}=138.1x+3\ 290.4$ ($R^2=0.79^*$)。这一结果表明相同碳投入条件下，小麦和玉米的相对产量增幅接近。进一步分析碳投入与SOC之间的关系，结果显示随着碳投入的增加，SOC含量显著提高，两者符合线性正相关，其关系式为：$y=2.37x+5.53$ ($R^2=0.983$, $P<0.01$；图3b)，表明灰漠土的SOC含量取决于SOC投入的累积效应，碳投入差异是造成土壤SOC含量差异的根本原因。

表 5 1990—2013 年长期不同施肥处理的灰漠土年均碳投入

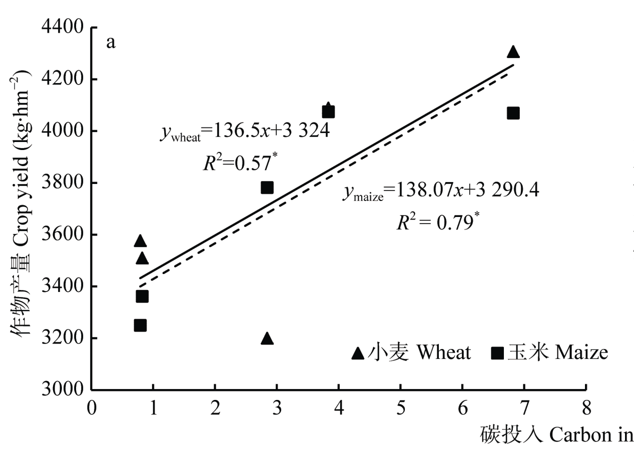
Table 5 Average carbon inputs of long-term different fertilization treatments in grey desert soil g(C)·hm$^{-2}$·a$^{-1}$

| 处理 Treatment | 年均碳投入 Average annual carbon input |
|---|---|
| CK | 0.731±0.480a |
| NP | 1.524±0.420b |
| NPK | 1.554±0.468b |
| NPKM | 4.565±0.450d |
| hNPKM | 7.552±0.436e |
| NPKS | 3.575±0.531c |

## 3 讨论

### 3.1 SOC 的变化

长期施用有机肥或秸秆能够显著增加 SOC 含量的效应已在很多试验中获得证明[13−16]。本试验中，增施有机肥和秸秆还田的 SOC 含量显著增加，这与已有的文献报道是一致的。因此采用有机无机配施技术是提高灰漠土肥力的首要培肥措施。但单施化肥是否能够提高 SOC 存在争议。李晨华等[17]利用新疆阜康灰漠土长期定位试验研究了不同施肥对土壤剖面有机碳含量的影响，结果表明长期施肥 20 年后，所有施肥处理的表层 SOC 含量均显著高于初始值 14%~56%，不施肥处理下降 33%。Whitbread 等[18]研究结果也显示，长期单施化肥能够增加作物产量，地下部作物残茬也相应增加，继而导致施用化肥比不施肥处理土壤有较高的有机碳含量。但也存在不同的试验结果，张璐等[19]对黑土、灰漠土、红壤长期施肥条件下土壤总有机碳变化研究表明，NP 处理 3 种土壤总有机碳基本维持初始值，而 NPK 处理 16 年后，黑土有机碳基本保持不变，灰漠土有机碳显著下降，而红壤有机碳显著增加。这可能与土壤类型、试验区域生态气候条件、土壤本底值、试验观测的周期有关。本试验中，施 NP 或 NPK 肥的 SOC 含量有缓慢下降趋势，但施用化肥却显著增加了作物产量，暗示了根系形成的残茬碳不足以弥补灰漠土碳损失，不能维持土壤肥力。此外，李晨华等[17]研究表明，灰漠土小麦秸秆还田处理显著提升了 SOC 含量，而在本研究中，NPKS 处理 SOC 较初始土壤和 NPK 处理虽有所提高，但未达到显著水平。因此在相同的土壤类型、相似的气候生态条件下，秸秆还田的方式将显著影响 SOC 的变化趋势，有必要进行深入研究。



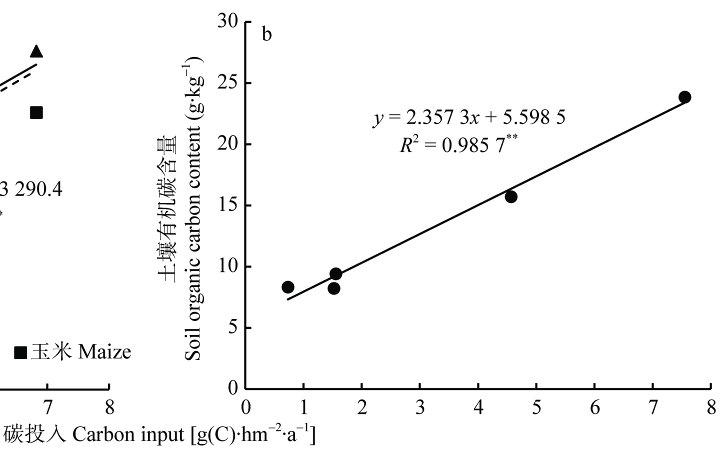




图 3 灰漠土小麦、玉米年均碳投入与作物产量和土壤有机碳含量的相关性

Fig. 3 Relationships of average annual carbon input of both wheat and maize with both crop yields (a) and soil organic carbon content (b) in grey desert soil

产量、土壤有机碳含量和年均碳投入数据均为施肥处理减去 CK 的差值。Data of yield, soil organic carbon content and average annual carbon input are difference values of fertilization treatments and non-fertilization treatment.

### 3.2 作物产量变化

土壤肥力的提升最终体现在作物生产力的提高[20]。王成已[21]收集 1979—2008 年我国 18 个省 24 个长期试验数据，对比分析了施肥对 SOC 及作物生产力影响，结果表明，在 106 个旱地样本和 50 个水田样本中，与不施肥相比，施化肥使小麦、玉米和水稻的 SOC 年增量分别为 1.00 g·kg$^{-1}$、1.25 g·kg$^{-1}$和 2.17 g·kg$^{-1}$，与此对应的，小麦、玉米和水稻的平均增产率为 173.5%、204.0%和 45.0%。这表明化肥提高了 SOC 含量，促进作物增产。Zhang 等[22]和 Yang 等[23]分析了我国南方红壤旱地和北方黄土长期不同施肥下小麦和玉米的产量，也获得了类似的结果。本试验结果表明，灰漠土有机碳与产量的演变趋势与红壤或黄土相似，但不同的是，施用化肥虽然使作物产量持续提升，但 SOC 含量有下降趋势，这也喻示灰漠土上作物产

量的形成是以消耗有机碳为前提。

## 4　结论

增施有机物料(有机肥、秸秆还田)提高 SOC，作为一项重要的农田培肥措施，已在国内外研究实践证明。但在新疆干旱绿洲灰漠土上，评估长期差异化施肥措施对有机碳的影响效应尚存不同之处，主要表现在：1)施用化肥是否能在提高产量的同时提高 SOC；2)采用秸秆还田措施能否显著增加 SOC 含量。本文利用新疆灰漠土长期定位试验 1990—2013 年 SOC 和作物产量的监测数据，研究了长期不施肥、施用化肥和有机肥对灰漠土有机碳和作物产量变化，结果表明：不施肥或施 NP、NPK 化肥使 SOC 下降 0.056~0.002 $g\cdot kg^{-1}$。长期施用有机肥可使灰漠土有机碳年均提高 0.305~0.626 $g\cdot kg^{-1}$，秸秆还田可使 SOC 含量年均递增 0.004 $g\cdot kg^{-1}$。这些结果为客观评价施用化肥和有机肥对灰漠土有机碳的影响效应提供参考。

土地生产力与 SOC 含量具有良好的相关性。SOC 含量是外源碳投入矿化和累积平衡的结果，它与碳投入具有显著线性关系。虽然农业生产中施肥制度不同，但可以通过测试有机肥碳含量以及根茬碳含量来计算不同施肥条件下的碳投入，继而分析碳投入作物产量之间关系。在本研究中，小麦、玉米产量与碳投入有良好的线性关系，因此在一定条件下，可作为预测作物产量的参考指标。

## 参考文献　References

[1] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. Nature, 1994, 371(6500): 783–785

[2] Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: A review[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 70(1): 1–18

[3] Lal R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by $CO_2$-enrichment[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 43(1/2): 81–107

[4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623–1627

[5] 周斌，乔木，王周琼．长期定位施肥对灰漠土农田土壤质量的影响[J]．中国生态农业学报, 2007, 15(2): 33–36
Zhou B, Qiao M, Wang Z Q. Effects of a long-term located fertilization on soil quality of grey desert soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 33–36

[6] 赵方杰．洛桑试验站的长期定位试验：简介及体会[J]．南京农业大学学报, 2012, 35(5): 147–153
Zhao F J. Long-term experiments at Rothamsted Experimental Station: Introduction and experience[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(5): 147–153

[7] 王伯仁，徐明岗，文石林．长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J] 水土保持学报, 2005, 19(1): 97–100
Wang B R, Xu M G, Wen S L. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 97–100

[8] 韩晓增，王凤仙，王凤菊，等．长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]．干旱地区农业研究，2010，28(1): 67–71
Han X Z, Wang F X, Wang F J, et al. Effects of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(1): 67–71

[9] 李婕，杨学云，孙本华，等．不同土壤管理措施下塿土团聚体的大小分布及其稳定性[J]．植物营养与肥料学报，2014，20(2): 346–354
Li J, Yang X Y, Sun B H, et al. Effects of soil management practices on stability and distribution of aggregates in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 346–354

[10] 王朔林，王改兰，赵旭，等．长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]．植物营养与肥料学报，2015，21(1): 104–111
Wang S L, Wang G L, Zhao X, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 104–111

[11] 邱建军，王立刚，李虎，等．农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]．中国农业科学, 2009, 42(1): 154–161
Qiu J J, Wang L G, Li H, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 154–161

[12] 姜桂英．中国农田长期不同施肥的固碳潜力及预测[D]．北京：中国农业科学院, 2013
Jiang G Y. Prediction of carbon sequestration potential of Chinese arable land under long-term fertilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013

[13] 吴乐知，蔡祖聪．基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算[J]．生态环境, 2007, 16(6): 1768–1774
Wu L Z, Cai Z C. Estimation of the change of top soil organic carbon of croplands in China based on long-trem experimental data[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1768–1774

[14] 黄晶，高菊生，张杨珠，等．长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J]．应用生态学报，2013，24(7): 1889–1894
Huang J, Gao J S, Zhang Y Z, et al. Change characteristics of rice yield and soil organic matter and nitrogen contents under various long-trem fertilization regimes[J]. Chinese Journal of

Applied Ecology, 2013, 24(7): 1889–1894
[15] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 676–684
Luo K, Hu R G, Zhang W J, et al. Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 676–684
[16] Rasmussen P E, Collins H P. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions[J]. Advances in Agronomy, 1991, 45: 93–134
[17] 李晨华, 唐立松. 长期施肥对绿洲农田土壤剖面有机碳及其组分的影响[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 637–644
Li C H, Tang L S. Long-term effect of fertilization application on soil organic carbon and its fractions in soil profiles of an oasis farmland[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(4): 637–644
[18] Whitbread A, Blair G J, Lefroy R D B. Managing legume leys, residues and fertilisers to enhance the sustainability of wheat cropping systems in Australia: 1 The effects on wheat yields and nutrient balances[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 54(1/2): 63–75
[19] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1646–1655
Zhang L, Zhang W J, Xu M G, et al. Effects of long-term fertilization on change of labile organic carbon in three typical upland soils of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(5): 1646–1655
[20] Gupta A P, Narwal R P, Antil R S. Influence of soil organic matter on the productivity of pear millet-wheat cropping system[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2003, 49(3): 325–332
[21] 王成己. 施肥和耕作长期试验下农田土壤有机碳及作物生产力变化的统计研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009
Wang C J. A statistical analysis of organic carbon and crop productivity of croplands under long-term agro-ecosystem experiments of tillage and fertilization of China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009
[22] Zhang H M, Wang B R, Xu M G, et al. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in southern China[J]. Pedosphere, 2009, 19(2): 199–207
[23] Yang X Y, Li P R, Zhang S L, et al. Long-term-fertilization effects on soil organic carbon, physical properties, and wheat yield of a loess soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(5): 775–784